

文章编号:1000-8055(2011)02-0331-06

针板结构冷却特性实验

张 斌, 朱惠人, 蔡 毅, 许都纯

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 在已研究放大型针板内表面换热特性的基础上, 在大尺寸低速回流风洞内, 实验研究了 5 套真实尺寸针板实验件的整体冷却效果. 研究表明: 针板具有很好的冷却效果, 孔间距与气膜孔径对冷却效果有很大影响, 孔间距越小, 气膜孔径越大冷却效果越好; 扰流柱直径的变化对针板冷却效果影响较小; 当吹风比一定时, 主流速度的变化对针板冷却效果影响亦比较小, 吹风比是影响气膜冷却效果的根本原因.

关 键 词: 燃烧室; 针板; 扰流柱; 冷却效果; 吹风比

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Experimental investigation of cooling effectiveness of spiculate lamilloy

ZHANG Bin, ZHU Hui-ren, CAI Yi, XU Du-chun

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Five true scale spiculate lamilloys were studied to analyze the cooling effectiveness based on the former inner surfaces' heat transfer characteristics, and an experiment was tested in a large-scale, low-speed close-looped wind tunnel. The result shows that very high cooling effectiveness can be achieved by using spiculate lamilloy. The ratio of hole pitch to impingement hole diameter (S/D) and the diameter of film hole (D_{out}) play important roles in determining the cooling effectiveness, the smaller S/D or larger D_{out} means higher cooling effectiveness. The pin diameter (D_{pin}) has little influence on cooling effectiveness. When blowing ratio is constant, the gas velocity also has little influence on cooling effectiveness, while blowing ratio is a major influential factor to film cooling effectiveness.

Key words: combustor; spiculate lamilloy; pin; cooling effectiveness; blowing ratio

努力提高燃气轮机的推质比是各国研制和发展高性能发动机不懈的追求目标, 而最有效的措施之一便是努力提高涡轮前温度, 所以高温部件燃烧室及涡轮的冷却一直是研究的热点^[1]. 层板冷却作为一种冲击强化冷却技术, 它既接近于发散热冷却的效果, 充分利用了冲击冷却传热系数高的优点, 同时又发挥了内部丰富的扩展面积强化换热效果, 因此具有冷却介质消耗少, 冷却效率高的特点, 对其进行深入研究非常重要. 国外 Fu-

nazaki 和 Yan 等人^[2-4]对传统结构层板的内部表面传热特性等做了一系列的研究和分析, 美英俄等发达国家已经对层板冷却技术进入实际应用阶段^[5]. 国内郁新华、全栋梁、陶智、孔满昭等人^[6-10]也对传统式层板的整体冷却效果及流阻等特性进行了系统的研究.

国内众多学者研究的层板结构为两边壁面, 中间铸有扰流柱, 三者合为一体的冷却结构, 鉴于这种结构在实际应用中存在不可忽视的工程问

收稿日期: 2009-12-09; 修订日期: 2010-05-24

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2007CB707701)

作者简介: 张斌(1984—), 男, 陕西榆林人, 硕士生, 主要从事航空发动机高温部件的传热与冷却技术研究.

题:即由于层板结构在径向温度梯度很大,扰流柱受到很大的热应力,因其两端和壁面铸为一体,使得层板在柱向方向产生的热应力不容易消除.针对以上问题,作者本人^[11]曾对一种非接触式层板(简称针板)的放大型结构进行了内换热研究,这种结构主要特点就是层板中间的绕流柱与冲击板面没有直接接触,呈微小的缝隙状(如图1),这

样就有条件满足在工程应用中消除热应力的要求,同时研究表明针板与传统结构相比,内表面同样具有高换热特点.为了继续开展针板的工程应用研究,本文在以前研究的基础上,优化设计了数套接近真实尺寸的金属针板实验件,进行了不同几何参数和流动参数下针板整体冷却效果的研究.

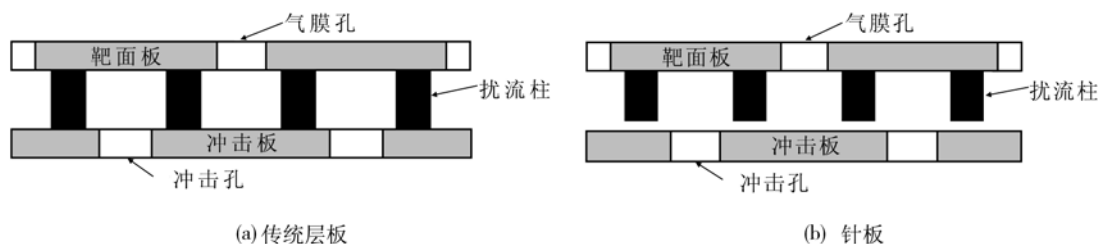


图1 传统结构的层板和针板结构层板示意图

Fig. 1 Traditional lamilloy model and spiculate lamilloy model

1 实验装置及实验件

航空发动机真实的工作环境为针板外侧是高温燃气,内侧为冷气的冷却.考虑到实验条件的限制,本实验中的主流为冷流,二次流为热气,在较小的温差下,物性的影响可以忽略,实验工况和主流是热流(燃气)仍可保持相似.图2给出了回流风洞结构示意图,该风洞于上世纪90年代研制,性能优异,在该风洞中曾进行了大量气膜冷却方面的实验研究^[12].风洞由收缩段、实验段、扩张

段、风机和冷却器构成;实验过程中保持主流温度为室温.二次流系统由压气机、浮子流量计、加热器、压力表、过滤网、稳压箱和针板实验件安装台等组成,加热器可以将二次流温度加热到高于主流60℃以上,足以满足传热实验需要.

针板实验件材料选用1Cr13,经过电化学腐蚀加工而成,外观为方形平板,尺寸为150 mm×150 mm,图3给出了其绕流结构示意图,且表1给出了5块实验件的尺寸表,编号分别为A1, B1, B2, B3, C1,其中字母代表三种孔间距,不同数

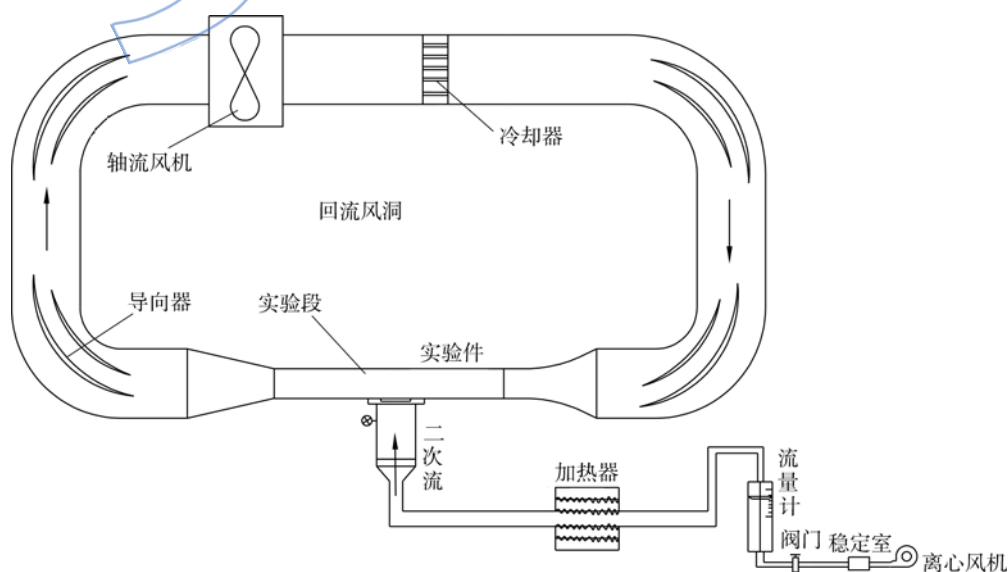


图2 大尺寸低速回流风洞实验系统图

Fig. 2 Experimental scheme of large-scale low speed close-looped wind tunnel

字表示其他参数有所不同. 其中孔间距为冲击孔或者气膜孔中心之间的距离, 实验中改变孔间距时冲击孔与气膜孔之间距离同时等比改变, 扰流柱距离也随之改变. 实验中在燃气侧(气膜孔侧)焊接了9根0.1 mm热电偶, 呈3×3对称均匀分布(图4), 温度数据经计算机采集模块自动处理.

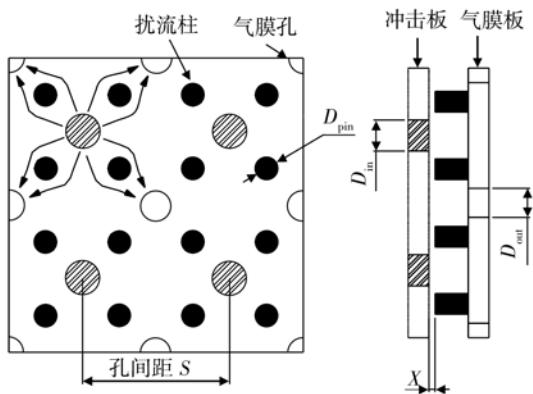


图3 针板件平面结构示意图

Fig. 3 Experimental model ichnography

表1 实验件几何参数

Table 1 Geometry parameters of lamilloy experimental model

型 号	$D_{in}/$ mm	$D_{out}/$ mm	$D_{pin}/$ mm	$H_{pin}/$ mm	$L_{in}/$ mm	$L_{out}/$ mm	$X/$ mm	S/D_{in}
A1	1.8	1.0	1.0	1.6	1.4	1.0	0.2	2.5
B1	1.8	1.0	1.0	1.6	1.4	1.0	0.2	2.8
B2	1.8	1.0	1.6	1.6	1.4	1.0	0.2	2.8
B3	1.8	1.5	1.0	1.6	1.4	1.0	0.2	2.8
C1	1.8	1.5	1.0	1.6	1.4	1.0	0.2	3.6

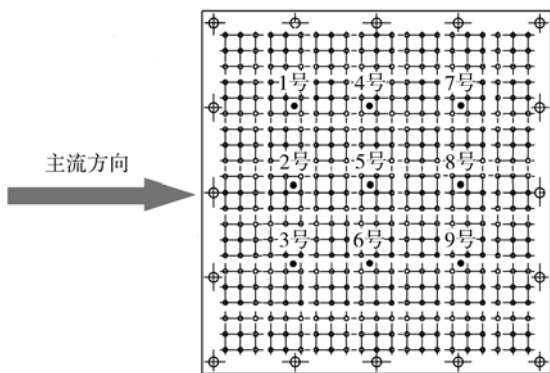


图4 针板气膜侧热电偶布置示意图

Fig. 4 Ichnography of experimental model's thermocouple position

2 数据处理方式

本实验通过测量针板的平均冷却效率来研究各种型号的针板的冷却性能.

冷却效率定义为

$$\eta = \frac{T_g - T_w}{T_g - T_c} \quad (1)$$

其中 T_g 为燃气温度, T_c 为冷气温度, T_w 为针板燃气侧平均壁温, 实验中均由热电偶测得, 其中针板燃气侧壁面温度由9根热电偶测得, 待实验温度稳定后取其平均值.

实验中还研究了针板在不同吹风比下的冷却性能. 吹风比定义为

$$R_b = \frac{\rho_c V_c}{\rho_g V_g} \quad (2)$$

其中分子为冷气密流, 分母为燃气侧密流, 实验通过改变不同二次流量得到不同吹风比.

3 误差分析

对于冷却有效性, 根据误差传递公式有

$$\frac{d\eta}{\eta} = \left\{ \left[\frac{T_g}{T_g - T_w} \frac{T_c - T_w}{T_g - T_c} \frac{dT_g}{T_g} \right]^2 + \left[\frac{T_w}{T_g - T_w} \frac{dT_w}{T_w} \right]^2 + \left[\frac{T_g - T_c}{T_c} \frac{dT_c}{T_c} \right]^2 \right\}^{0.5} \quad (3)$$

按保守情况估计 $\frac{dT_w}{T_w} = 3\%$, $\frac{dT_c}{T_c} = 3\%$, $\frac{dT_g}{T_g} = 3\%$ 以及 $T_g = 291 \text{ K} (18^\circ \text{C})$, $T_c = 333 \text{ K} (60^\circ \text{C})$, $T_w = 328 \text{ K} (55^\circ \text{C})$, 可以得到

$$\frac{d\eta}{\eta} \leq 5.0\%$$

4 实验结果及分析

4.1 孔间距对针板冷却效率的影响

在以往的层板或针板研究中, 孔间距对内换热的影响很大, 下面分析孔间距对针板整体冷却效率的影响. 实验中分别改变三种 S/D (S/D 为无量纲化的孔间距与冲击孔径比值, 即 $S/D = 2.5, 2.8, 3.6$, 分别对应图5中的A1, B1, C1曲线. 其中A1和B1的气膜孔径一样, C1的气膜孔径要稍微大一些. 为了更加清楚的对比, 图5(a), (b)分别给出了针板冷却效率随吹风比和冷气量的变化规律趋势图, 主流速度保持不变.

从图5看出, 不同孔间距下针板的整体冷却效率相差较大. 首先不同孔间距的针板冷却效率

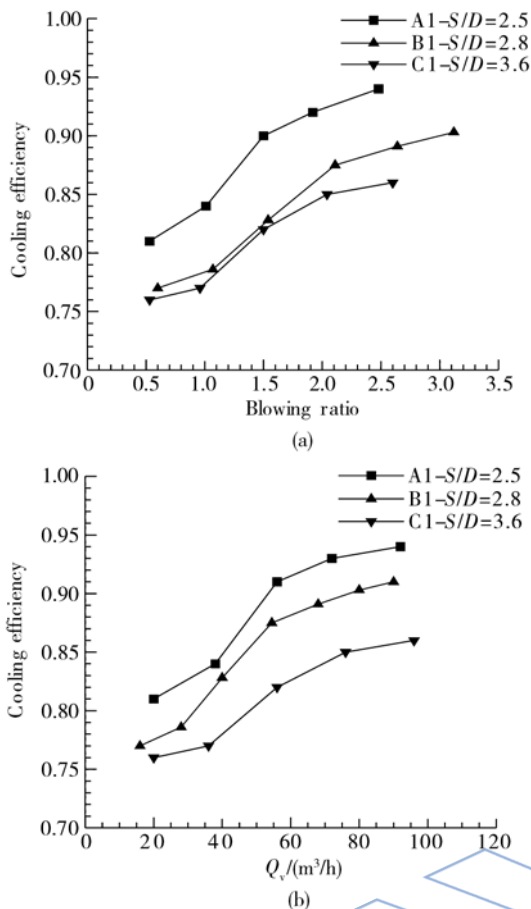


图5 不同孔间距对针板冷却效率的影响
Fig. 5 Effect of different S/D on the cooling efficiency

都随着吹风比的增大而增大,并且最后趋于平缓,在相同冷气量下,孔间距越小,针板冷却效率越高,孔间距越大冷却效率越低。通过分析可知:孔间距表征这样一个特征,即针板燃气侧气膜孔覆盖的密度,孔间距越小,说明单位燃气侧面积内气膜孔个数越多或者冷气出气面积越大,随着孔间距的减小,针板在燃气侧能更好的形成高密度的冷气膜,主流对针板外壁面的影响也就随之降低,针板的冷却效率就会大幅提高;同样随着孔间距的增大,燃气侧不能形成很好的连续气膜覆盖面,主流在气膜孔之间的作用仍然很强烈,所以针板的整体冷却效率就降低。

总之,孔间距的变化主要影响燃气侧气膜冷却效率,同时由前期内换热的研究^[11]也可知道,孔间距对针板内表面换热影响也非常大,趋势亦同;所以可以得出这样结论:孔间距越小,针板冷却效率越高,孔间距越大,针板冷却效率越低。

4.2 气膜孔径对针板冷却效率的影响

实验研究了气膜孔直径变化对针板冷却效率

的影响情况,以B1与B3为研究对象,这两种型号针板除了气膜孔直径不一样外,其他参数均相同。其中B1的气膜孔直径为1 mm, B3的气膜孔直径为1.5 mm。为了说明问题,本文同样给出了冷却效率随吹风比和冷气量变化趋势图,如图6(a), (b)所示。

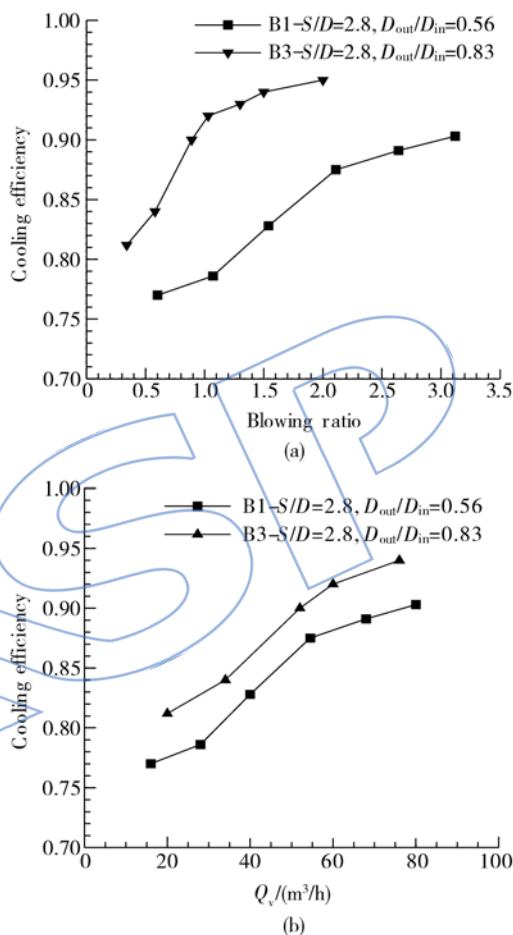


图6 不同气膜孔径对针板冷却效率的影响
Fig. 6 Effect of different D_{out}/D_{in} on the cooling efficiency

图6(a)显示在相同吹风比的情况下,气膜孔直径越大,冷却效率越高,通过图6(b)也可以看出相同冷气流量下,气膜孔径越大,冷却效率也越高。可以解释为:气膜孔直径越大,单位燃气侧面积的开孔率就越高,若吹风比一致,则单位时间内流通过冷气量就越大,而且能形成很好的气膜覆盖,冷却效果就越好;若冷气量一致,则主要是通过改变燃气侧气膜覆盖效果来实现提高冷却效率的。所以可以得出这样结论:气膜孔直径对提高针板冷却效率有较大影响,直径越大,冷却效率越高,反之亦然。

4.3 扰流柱直径对针板冷却效率的影响

实验中,同样对比了 B1 与 B2 组扰流柱直径变化对冷却效率的影响. B1 的扰流柱直径为 1 mm, B2 的扰流柱直径为 1.6 mm,如图 7 所示.从图中可以看出,两者的冷却效率随着吹风比的增大而均增大,同时也很清晰地看出 B2 的冷却效率要比 B1 稍微高一些,尤其是在吹风比不是很大时;当吹风比继续增加时,两者的冷却效率基本趋于一致.即通过图 7 可以反映出扰流柱直径越大,同工况下针板冷却效率就越高,而且在小吹风比下更为明显.说明当两种针板其他参数一致时,只改变扰流柱直径,即针板的外壁面换热是一样的,也就是说只能通过内部换热的不同而影响到整体冷却效率,在针板的内换热研究^[11]中已经得知,扰流柱直径增大,靶面传热系数有所提高,冲击面有略微下降,但下降的幅度比起靶面的提高幅度要小,所以在研究范围内,扰流柱直径越大,内换热越强,那么针板的整体冷却效率也就自然而然提高了.因此亦可得出:扰流柱对针板冷却效率有一定影响,在本实验研究的范围内,扰流柱直径大一些针板冷却效果会好一些,但整体影响较小,设计时可以作为次要因素考虑.

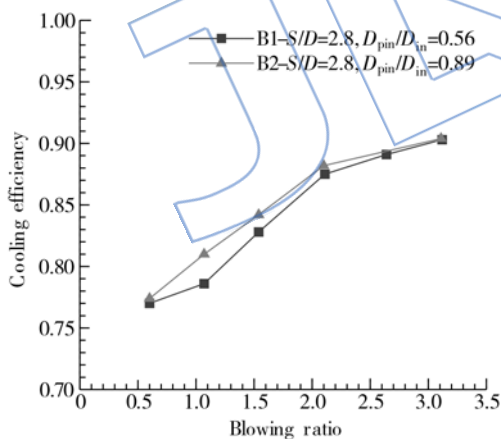


图 7 扰流柱直径对针板冷却效率的影响

Fig. 7 Effect of different D_{pin}/D_{in} on the cooling efficiency

4.4 主流速度对针板冷却效率的影响

在前面的研究中,实验都是保持主流的速度为恒定值,通过改变二次流研究针板冷却效率变化规律.为了更为深入的研究,本文同样研究了不同主流速度下针板的冷却特性,实验中保持恒定的吹风比(实验中 $R_b=1$),改变主流速度,同时二次流速度也随之改变,研究针板在不同主流速度

下的冷却效率.由于实验条件所限制,回流风洞中选取的主流速度为 5~25 m/s,研究针板在此区间的冷却效率变化规律.

如图 8 所示,实验中只研究了 A, B 系列 3 块针板的冷却效率随主流速度的变化趋势.从图中可以总体看出,随着主流速度的增大,冷却效率开始稍微有些下降,但到最后基本维持不变,反映出主流速度变化对针板冷却效率的影响范围比较小.说明在流动初期,由于二次流覆盖强度比起主流速度的冲刷强度要小,所以随着主流速度的增大,会一定程度上破坏气膜覆盖,导致冷却效率有所下降,但随着主流速度的增大,冷却效率维持不变,这是由于主流和二次流的相互作用开始变得相当,对针板的冷却效率影响也就不大了.总之,可以认为:吹风比是影响气膜冷却的根本原因,当吹风比一定时,主流速度的改变对针板的整体冷却效率影响比较小.

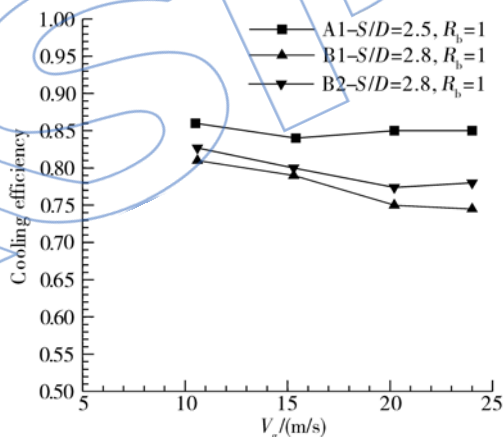


图 8 主流速度对针板冷却效率的影响

Fig. 8 Effect of different V_g on the cooling efficiency

5 结 论

通过对针板冷却特性的实验结果分析,得到如下结论:

- 1) 孔间距对针板冷却效果影响很大,孔间距越小,针板冷却效果越好,孔间距越大,针板冷却效果越差;
- 2) 气膜孔直径对提高针板冷却效果也有很大影响,直径越大,冷却效果越好,反之亦然;
- 3) 扰流柱直径的变化对针板冷却效果影响很小,本实验范围内扰流柱直径大一些,针板冷却效果要好一些;

4) 吹风比一定时,主流速度的改变对针板的整体冷却效果影响相对较小,吹风比是影响气膜冷却效果的根本原因。

参考文献:

- [1] Nealy D A, Reider S B. Evaluation of laminated porous wall material for combustor liner cooling[J]. Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Power, 1980, 102:268-276.
- [2] Funazaki K, Hachiya K. Systematic numerical studies on heat transfer and aerodynamic characteristics of impingement cooling devices combined with pins[R]. ASME Paper GT2003-38256, 2003.
- [3] Funazaki K, Tarukawa Y, Kudo T, et al. Heat transfer characteristics of an integrated cooling configuration of ultra-high temperature turbine blades: experimental and numerical investigations[R]. ASME Paper 2001-GT-0148, 2001.
- [4] Yan Y Y, Owen J M. Uncertainties in transient heat transfer measurements with liquid crystal [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2002, 23(1):29-35.
- [5] 桂忠楼, 张鑫华, 钟振纲, 等. 高效冷却单晶涡轮叶片制造技术的发展[J]. 航空工程与维修, 1998, 232(2):11-13. GUI Zhonglou, ZHANG Xinhua, ZHONG Zhengang, et al. Manufacture technology development of the single-crystal blades and vanes with highly effective cooling [J]. Aviation Engineering and Maintenance, 1998, 232(2):11-13. (in Chinese)
- [6] 郁新华, 全栋梁, 刘松龄. 层板结构冷却有效性的研究[J]. 航空动力学报, 2003, 18(5):615-622. YU Xinhua, QUAN Dongliang, LIU Songling. Investigation of the cooling effectiveness of lamilloy[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(5):615-622. (in Chinese)
- [7] 全栋梁, 刘松龄, 李江海. 层板冷却结构强化换热机理[J]. 航空动力学报, 2004, 19(6):860-865. QUAN Dongliang, LIU Songling, LI Jianghai. Numerical investigation on mechanism of heat transfer augmentation in lamilloy[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(6):860-865. (in Chinese)
- [8] 全栋梁. 层板叶片冷却特性的研究[D]. 西安:西北工业大学, 2005. QUAN Dongliang. Investigation of the cooling characteristics of lamilloy turbine blade [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005. (in Chinese)
- [9] 陶智, 吕东, 丁水汀, 等. 扰流柱直径对倾斜出气孔层板内流动和换热影响的数值研究[J]. 航空动力学报, 2007, 22(4):540-546. TAO Zhi, LÜ Dong, DING Shuiting, et al. Numerical study on the influences of pin-fin diameter on the flow resistance and heat transfer of leaning vent hole lamilloy[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(4):540-546. (in Chinese)
- [10] KONG Manzhao, ZHU Huiren, LIU Songling, et al. Internal heat transfer characteristics of lamilloy configurations [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2008, 21(1):28-34.
- [11] 张斌, 朱惠人, 许都纯. 针板结构内壁面的换热特性研究[J]. 航空动力学报, 2009, 25(4):786-793. ZHANG Bin, ZHU Huiren, XU Duchun. Investigation of heat transfer characteristics of spiculate lamilloy internal [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 25(4):786-793. (in Chinese)
- [12] 朱惠人, 许都纯, 刘松龄, 等. 气膜孔形状对孔排下游换热的影响[J]. 航空动力学报, 2001, 16(4):360-364. ZHU Huiren, XU Duchun, LIU Songling, et al. Effect of film cooling hole shape on heat transfer [J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(4):360-364. (in Chinese)